



■ Henna Etula



■ Harri Antikainen

Henna Etula ja Harri Antikainen

Reitinoptimoinnin hyödyllisyys metsävaratiedon keruun maastotyössä

Etula, H. & Antikainen, H. 2014. Reitinoptimoinnin hyödyllisyys metsävaratiedon keruun maastotyössä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2014: 81–99.

Reitinoptimointi maastossa ei ole ollut laajasti tutkittu aihe. Metsäkeskuksen metsäinventointityöhön soveltuvaa reitinoptimointimenetelmää on kehitetty muutaman vuoden ajan. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli testata menetelmää ensimmäisen kerran todellisen maastotyön yhteydessä. Testauksessa selvitettiin reitinoptimointityökalun toimivuutta, reitinoptimoinnin vaikutusta työn tuottavuuteen ja kerättiin testaajien mielipiteitä menetelmän hyödyllisyydestä. Reitinoptimointimenetelmän periaatteet havaittiin toimiviksi. Kehitetyllä reitinoptimointityökalulla pystyttiin tuottamaan yleensä toimivia reittejä. Toisinaan reitit olivat kuitenkin epäloogisia. Reitinoptimoinnin merkityksestä työn tuottavuudelle ei pystytty tekemään luotettavia johtopäätöksiä. Testaajien mielipiteiden mukaan menetelmästä oli kuitenkin vähintään jonkin verran hyötyä enemmistölle testaajista. Reitinoptimointityökalu vaatii vielä jatkokehitystä, jotta siitä saataisiin tuotantokäyttöön soveltuva. Kehitystyön jälkeen menetelmän hyödyllisyyden voidaan arvioida edelleen kasvavan. Käytännön soveltamisessa työkalun tuottamia reittejä tulisi pitää apuvälineenä, joiden avulla ihminen voisi päättää lopullisen käyttämänsä reitin. Menetelmä on sovellettavissa myös muuhun maastossa liikkumiseen. Tällöin reitinlaskentaan vaikuttavat lähtötiedot on selvitettävä tapauskohtaisesti.

Asiasanat: reitinoptimointi, metsäinventointi, metsävaratieto, maastotyö, kustannuspinta

Yhteystiedot: *Etula*: Suomen metsäkeskus, Vaasa; *Antikainen*: Oulun yliopisto, Maantieteen laitos

Sähköposti henna.etula@metsakeskus.fi

Hyväksytty 9.6.2014

Saatavissa <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff14/ff142081.pdf>

I Johdanto

I.1 Metsävaratiedon keruu yksityismetsistä

Yksi Suomen metsäkeskuksen lakisääteisistä tehtävistä on metsävaratiedon keruu yksityismetsistä. Tiedonkeruu on perustunut aiemmin alueelliseen metsäsuunnitteluun. Inventointimenetelmien kehittyminen ja paineet kustannustason laskemiseen ohjasivat Metsäkeskusta siirtymään uuteen kaukokartoituspohjaiseen metsäinventointimenetelmään. Menetelmä perustuu laserkeilausaineiston, ilmakuvien ja maastossa mitattujen referenssikoealojen hyödyntämiseen (Maltamo ym. 2011). Näiden lähtötietojen avulla voidaan tuottaa luotettava puustotieto nuorille kasvatusmetsiköille, varttuneille kasvatusmetsiköille ja uudistuskypsille metsiköille. Sen sijaan aukeilta alueilta ja taimikoista ei saada tällä hetkellä luotettavaa tietoa kaukokartoitusmenetelmillä. Tällaisten metsikkökuvien tiedot kerätään maastossa, eli suoritetaan ns. kohdennettu maastoinventointi. Uuteen tiedonkeruumenetelmään siirtymisen tavoitteena oli laskea metsävaratiedon keruun kustannuksia 40 %. Tavoitteeseen on päästy kolmen ensimmäisen tuotantovuoden jälkeen ja toimintatavan muututtua rutiiniksi viimeisimmät inventointialueet alittavat kustannusten tavoitetason selvästi. Metsävaratiedon keruuta tehdään valtion rahoituksella ja paineita kustannusten vähentämiseen on edelleen.

Kustannuksia pyritään laskemaan monin eri tavoin. Metsävaratiedon keräämisessä tarvittavien aineistojen hankintaa pyritään tekemään yhteistyönä. Yhteistyötä ilmakeu- ja laserkeilausaineistojen hankinnassa syvennetään Maa- ja Metsätalousministeriön hallinnonalalla. Koealamittausta pyritään tehostamaan selvittämällä, voidaanko Valtakunnan Metsien Inventoinnissa ja Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon keruussa käyttää yhteistä koealaineistoa (Tuominen ym. 2014). Tutkimus koealamittauksen yhteistyöstä jatkuu edelleen Metsätutkimuslaitoksen tutkimushankkeessa 7548.

Vuonna 2013 kohdennettuun maastoinventointiin käytettiin 35 % metsävaratiedon keruuseen ja ajantasaisuuteen liittyviin tehtäviin kuluneesta työajasta. Tällä työajan käytöllä inventointiin maastossa noin 17 % samana vuonna kerätystä metsävaratiedosta.

Maastotyö on selvästi toimistotyötä kalliimpaa. Tämän vuoksi on pyritty löytämään keinoja maastossa inventoitavien kuvien osuuden vähentämiseen. Puustotulkintaa yritetään ulottaa varttuneista puustoista myös taimikoihin (Korhonen ym. 2013). Samaa tavoitteeseen tähtää myös metsävarakuvien tietojen selvittäminen metsävaratiedon ajantasaisuuden periaatteilla (Etula ja Store 2011) käyttämällä hyväksi taimikon perustamisilmoituksia ja tietoja taimikonhoidosta. Tämänhetkellä menetelmällä kaikkia kuvioita ei ole mahdollista inventoida kaukokartoituspohjaisesti, eikä kaikista niistä ole saatavilla luotettavaa tietoa muistakaan lähteistä. Koska maastotyötä tarvitaan, tulisi myös selvittää, kuinka maastotyötä voidaan tehdä mahdollisimman tehokkaasti.

Maastotyön vähentämisen ja tehostamisen välillä on selkeä riippuvuussuhde. Reitin suunnittelu on melko yksinkertaista, mikäli maastossa inventoitavia kuvioita on paljon ja ne ovat lähellä toisiaan. Kun maastossa inventoitavien kuvien osuus on pieni, kuviot sijaitsevat enemmän hajallaan ja siirtymiseen käytettävä aika lisääntyy verrattuna varsinaiseen inventointityöhön käytettyyn aikaan. Tällöin inventoijan on pohdittava tarkemmin, mitä reittiä siirtymät kuviolta toiselle kannattaa kulkea. Kuvien järjestäminen tehokkaaseen järjestykseen saattaa olla ihmiselle vaikeaa. Paikallistuntemus sekä hyvä peruskartan ja ilmakuvan tulkintamiskyky auttavat reitin suunnittelussa, mutta inventoija saattaa olla kokematon tai liikkua itselleen vieraalla alueella, jolloin parhaan mahdollisen reitin suunnittelu ei ole yksinkertainen tehtävä.

I.2 Reitinoptimointi maastossa

Maastossa tapahtuvassa reitinoptimoinnissa on tavanomaisesta, tieverkolla tapahtuvasta reitinoptimoinnista poiketen pystyttävä käsittelemään jatkuvaa pintaa, jonka kulkukelpoisuus vaihtelee esimerkiksi maapohjan tai puuston mukaan. Paikatietomenetelmien alalla maasto kuvataan tätä tarkoitusta varten tavallisimmin rasterimuotoisena kustannuspintana, jossa rasterin soluun on tallennettu kulkukustannus. Paras reitti eri kohteiden välille lasketaan minimoimalla kustannuspinnalta laskettu kumulatiivinen kulkukustannus (Miller ja

Shaw 2001).

Suuri osa aiheeseen liittyvästä tutkimuksesta on keskittynyt erilaisten ajoneuvojen liikkumiseen maasto-oloissa (esimerkiksi Suvinen ym. 2009, Won-Ik ym. 2013). Jalankulkijoiden liikkumista maastossa on tutkittu selvästi vähemmän. Kustannuspinnan käyttöön perustuvia menetelmiä ovat esitelleet Xiang (1996), Balstrøm (2002) ja Rees (2004). Kansainvälisissä tutkimuksissa hyödynnetyt menetelmiä on mahdollista soveltaa Suomessa, mutta käytettävä kustannuspinta on muodostettava suomalaista maastoa kuvaavaksi. Antikainen (2009), Tapanainen (2010) sekä Etula ja Antikainen (2012) ovat esitelleet reitinoptimointimenetelmiä ja arvioita kotimaisista kustannusarvoista. Kotimaisia menetelmiä ei ole testattu maasto-olosuhteissa, joten kustannuspintaan perustuvan reitinoptimoinnin toimivuudesta tai esitettyjen kustannusarvojen luotettavuudesta ei ole tietoa.

1.3 Metsäinventointiin soveltuvan reitinoptimointimenetelmän kehittäminen

Kustannuspintaan perustuva reitinlaskenta mahdollistaa optimaalisen kulkureitin määrittämisen kahden kohteen välille. Monimutkaisempien, useiden kohteiden kautta kiertävien kulkureittien laskenta maastossa vaatii kuitenkin edistyneempien menetelmien soveltamista ja kehittämistä. Kustannuspinta ja sen perusteella eri kohdeparien välille laskettavat reitit toimivat tällöin pohjana varsinaiselle reitinoptimoinnille. Metsäkeskuksen metsävaratiedon keruuseen soveltuvaa reitinoptimointimenetelmää on kehitetty muutaman vuoden ajan. Kehitystyössä on sovellettu Antikaisen ja Storen (Antikainen 2009, Store ja Antikainen 2010) esittelemää menetelmää, joka mahdollistaa tehokkaimman inventointireitin määrittämisen haluttujen metsikkökuvioiden kautta siten, että reitin ajallinen kesto on korkeintaan sallitun maksimiajan mittainen. Kyseinen menetelmä vaatii kuitenkin edelleen kehittämistä maaston luokituksen, vuodenaikojen vaihtelun ja kaltevuuden huomioimiseksi. Lisäksi esitetyssä menetelmässä metsikkökuviot mallinnettiin pistemäisinä kohteina, mikä ei kuvaa metsikkökuvioiden aluemaista luonnetta.

Kustannuspinnan muodostamisessa tarvittavat kustannusarvot määritettiin asiantuntijatietämyksen mallinnuksen avulla (Etula ja Antikainen 2012). Asiantuntijoina käytettiin Suomen metsäkeskuksen metsäneuvoja, jotka tekevät metsävaratiedon keruuta maastossa useita kuukausia vuodessa. Maasto luokiteltiin käytettävissä olevien aineistojen perusteella mahdollisimman tarkasti. Kustannusten määrittämisessä huomioitiin vuodenaikojen vaihtelu erottamalla aika, jolloin puissa on lehdet sekä määrittämällä, että pelloilla ei voi kulkea viljelykaudella. Vuodenajan vaikutuksen huomioiminen rajattiin vain lumettomaan aikaan, koska metsävaratiedon keruuta ei pääsääntöisesti tehdä talviaikaan. Samalla selvitettiin, kuinka maaston kaltevuus voidaan huomioida reitinlaskennassa.

Seuraava askel menetelmän kehittämiseksi oli aluemaisen kohteen inventoinnin ongelman määrittely ja ratkaisu (Etula ja Antikainen 2014). Aluemaisen kohteen inventoinnin ongelmassa kohteella liikutaan käymällä n havaintopisteellä ja tekemällä lisäksi havaintoja reitin varrelta. Kuljettu reitti puskuroidaan sopivalla etäisyydellä, jolla kuvataan reitiltä saavutettua näkymää. Saavutetun näkymän tulee olla riittävän suuri, jotta koko kohde voidaan määritellä inventoiduksi. Kuljetun matkan pituus pyritään samalla minimoimaan inventoinnin tehokkuuden huomioimiseksi. Kyseessä on NP-täydellinen (Nondeterministic Polynomial time complete) ongelma (Garey ja Johnson 1979). Tämä tarkoittaa, että ongelman ratkaisuaika kasvaa eksponentiaalisesti lähtöaineiston kasvaessa. Tällöin yhden kuvion sisällä kulkevan inventointireitin laskemiseen voi mennä jopa vuorokausia, jolloin kokonaisen inventointireitin tuottaminen muuttuu mahdottomaksi. NP-täydelliset ongelmat ratkaistaan tyypillisesti heuristisia algoritmeja käyttäen. Aluemaisen kohteen inventoinnin ongelman ratkaisemiseksi artikkelissa esiteltiin myös heuristiikkaan perustuva työkalu.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli testata Suomen metsäkeskuksen käyttöön kehitettyä inventointimenetelmää käytännön inventointityössä, sillä maas-

totestausta ei ollut tehty kehitystyön aiemmissa vaiheissa. Tavoitteena oli selvittää seuraavat asiat:

- 1) toimiiko reitinoptimointityökalu loogisesti tuotantokäytössä,
- 2) mitä mieltä testaaajina toimineet henkilöt ovat reitinoptimoinnin hyödyllisyydestä,
- 3) lisääkö reitinoptimoinnin käyttö työn tuottavuutta ja
- 4) nouseeko menetelmän soveltamisen aikana uusia jatkokehitystarpeita.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Testialueet ja testaustapa

Maastotestauksen aineisto kerättiin Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon keruun yhteydessä keuhalla 2013. Maastotestaukseen osallistui kahdeksan testaaajaa eri puolilta Suomea (taulukko 1). Testialueiden valintaperusteina olivat testauksen sopivuus tuotantotyön yhteyteen, testaaajien halu osallistua sekä se, oliko alue valmisteltu maastotöitä varten riittävän ajoissa ennen maastokauden alkua. Testaaajat jakautuivat selvästi kahteen ryhmään maastotyökokemuksen perusteella. Puolet testaaajista oli hyvin kokeneita, puolet taas oli tehnyt kahdesta kolmeen maastokautta kestäneen työuran vastaavissa tehtävissä. Kukaan testaaajista ei ollut aivan kokematon. Testialueet on merkitty kuvaan 1.

Maastotestaus oli kolmivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa testaaajat tekivät kohdennettua maastoinventointia ilman valmiiksi laskettuja reittejä. Ensimmäisen vaiheen aineisto muodosti vertailuaineiston, johon varsinaista toisessa ja kolmannessa vaiheessa kerättyä testiaineistoa verrattiin. Toisessa vaiheessa testaajalle laskettiin valmiit reitit, jota he noudattivat maastossa. Reitinlaskennan perusteena olevassa kustannuspinnassa käytettiin jokaisella testaajalla samoja kustannusarvoja (Etula ja Antikainen 2012). Kolmannessa vaiheessa reitit laskettiin käyttäen jokaiselle testaajalle henkilökohtaista kustannuspintaa. Testaaajat arvioivat itselleen sopivat kustannusarvot toisen vaiheen lopussa. Jokainen vaihe kesti kymmenen maastopäivää. Maastotestaus suoritettiin



Kuva 1. Reitinoptimoinnin testaaajien maantieteellinen sijoittuminen.

testaaajien oman työn yhteydessä huomioiden heidän mahdolliset muut työtehtävänsä sekä lomansa. Koko aineisto kerättiin 20.5.–5.9.2013 välisenä aikana.

2.2 Lähtöaineisto

Testin alkaessa metsävaratieto oli valmisteltu kohdennettua maastoinventointia varten. Laserkeilaus, ilmakeilaus, koelamittaus, metsikkökuviointi ja puustotulkinta oli tehty aiemmin. Metsävara-aineisto oli viety Metsäkeskuksen metsävaratietojärjestelmään. Puustotulkinnassa luotettavasti inventoidut kuviot olivat järjestelmässä valmiina. Kohdennettua maastoinventointia tarvitseville kuvioille oli määritetty maastoinventoinnin tarve, joka on määritelty perusohjeen mukaisesti seuraavasti:

Taulukko 1. Testialueiden kuvaus.

Sijaintikunta	Kokonaispinta-ala, ha	Inventoitavien kuvioiden osuus pinta-alasta, %	Testaajan maastotyökokemus
Pudasjärvi	10700	14,2	Paljon
Kuusamo	18600	15,3	Jonkin verran
Jämijärvi	12100	12,2	Paljon
Karvia	11400	15,6	Paljon
Pieksämäki	9200	22,7	Jonkin verran
Hämeenlinna	8200	19,0	Jonkin verran
Korsnäs	10800	12,6	Jonkin verran
Närpiö	3300	19,7	Paljon

Pudasjärvi: Ei peltoja. Jonkin verran vesistöjä. Pääosin yhtenäistä metsää. Melko paljon korkeusvaihtelua. Puuston kehitysluokkajakauma: kulkukelpoisuuden kannalta helppoja kehitysluokkia (03, 04, A0, S0, T1) 40 % ja vaikeita (T2, 02) 60 %.

Kuusamo: Ei peltoja. Jonkin verran pieniä vesistöjä. Pääosin yhtenäistä metsää. Paljon korkeusvaihtelua. Noin kolmasosa pinta-alasta turvemaata. Suuria tiloja. Mäntyvaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 50 % ja vaikeakulkuisia 50 %.

Jämijärvi: Paljon peltoja, jotka lomittain metsäalueiden kanssa. Melko vähän korkeusvaihtelua. Noin viidesosa pinta-alasta turvemaata. Melko suuria tiloja. Melko mäntyvaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 70 % ja vaikeakulkuisia 30 %.

Karvia: Melko paljon peltoja lomittain metsäalueiden kanssa. Vähän korkeusvaihtelua. Lähes puolet pinta-alasta turvemaata. Pääasiassa melko suuria tiloja, mutta jonkin verran kapeita sarkoja. Mäntyvaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 65 % ja vaikeakulkuisia 35 %.

Pieksämäki: Melko paljon pieniä peltoja ja vesistöjä lomittain metsäalueiden kanssa. Melko paljon korkeusvaihtelua. Noin kolmasosa pinta-alasta turvemaata. Melko suuria tiloja. Kuusivaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 60 % ja vaikeakulkuisia 40 %.

Hämeenlinna: Melko paljon peltoja lomittain metsäalueiden kanssa. Paljon korkeusvaihtelua. Noin kymmenesosa pinta-alasta turvemaata. Melko suuria tiloja. Kuusivaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 75 % ja vaikeakulkuisia 25 %.

Korsnäs: Laajoja peltoalueita, mutta metsäalueet varsin yhtenäisiä. Vähän korkeusvaihtelua. Noin kolmasosa pinta-alasta turvemaata. Epäedullinen tilarakenne, nauhasarkoja. Melko mäntyvaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 60 % ja vaikeakulkuisia 40 %.

Närpiö: Laajoja peltoalueita, mutta metsäalueet varsin yhtenäisiä. Vähän korkeusvaihtelua. Noin kolmasosa pinta-alasta turvemaata. Epäedullinen tilarakenne, nauhasarkoja. Melko mäntyvaltainen puusto. Helppokulkuisia kehitysluokkia 55 % ja vaikeakulkuisia 45 %.

- Kuvion kehitysluokka on aukea alue (A0), pieni taimikko (T1) tai varttunut taimikko (T2), koska näihin kehitysluokkiin ei voida tuottaa luotettavia tietoja puustotulkinnessa.
- Kuvion pohjapinta-ala on pieni, esimerkiksi alle 10 m²/ha. Tällä pyritään lisäämään maastointointiin esimerkiksi ylispuustoiset taimikot (Y1) ja siemenpuumetsiköt (S0).
- Kuvion hilayleistyksen laatu on heikko tai huonempi. Tämä tarkoittaa hilamuotoisena 16 m × 16 m ruudukkona toimitetun puustotulkinta-aineiston kuviokohtaisesta yleistämisestä syntynyttä laatutunnusta.
- Perusvalinnan jälkeen maastoinventoinnin tarve on poistettu kuvioilta, jotka ovat kitu- tai joutomaata tai eivät ole yksityismaata.
- Metsäkeskuksen alueyksiköiden resursseista ja toimintatavoista riippuen osalla testialueista oli täydennetty metsävarakuvioiden tietoja taimikon perustamisilmoitusten tai taimikonhoidon Kemera-rahoitushakemusten avulla ja samalla poistettu kuvion maastointointitarve.

Seuraavaksi koottiin aineisto kustannuspintojen muodostamista varten. Kultakin testialueelta tar-

Taulukko 2. Maastotestauksessa käytettyjen kulkukelpoisuusluokkien kustannusarvot. Tapaukset, joissa testaja ei halunnut muuttaa kustannusarvoa kolmannessa vaiheessa, on merkitty viivalla (–). Testaajiin viitataan testialueen tunnuksilla (A Pudasjärvi, B Kuusamo, C Jämijärvi, D Karvia, E Pieksämäki, F Hämeenlinna, G Korsnäs ja H Närpiö).

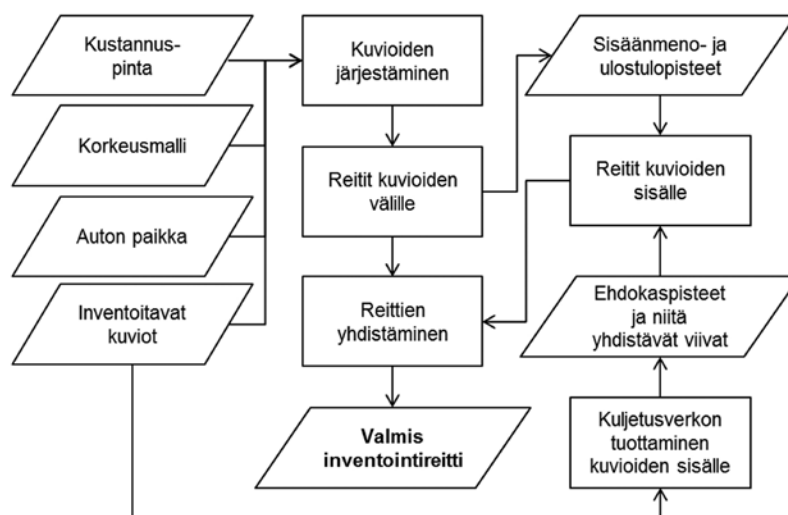
Kulkukelpoisuusluokka	Vakio	Testaajien henkilökohtaiset kustannusarvot kolmannessa vaiheessa							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Polku	1	1,084	–	1,5	1,5	–	–	–	–
Rauhallinen tie	1,084	1	–	1,5	1,5	1	1	–	–
Kivennäismaa, kehitysluokka 03 tai 04	2,156	–	–	–	3,156	2,5	–	–	–
Kivennäismaa, A0, T1 tai S0	2,19	–	–	–	3,190	3,5	2,5	–	–
Pellon reuna	2,383	–	–	–	–	1,5	3	–	–
Kivennäismaa, T2 tai 02, tiheys alle 4000 kpl/ha, lehti puussa	3,287	–	–	–	4,287	5	–	–	–
Kallio	3,293	3	–	–	–	5	3	–	–
Turvemaa, ei ojia tai kulku ojien suuntaisesti, 03 tai 04	4,263	–	–	–	–	6	4,5	–	–
Turvemaa, ei ojia tai kulku ojien suuntaisesti, A0, T1 tai S0	4,297	–	–	–	–	5	4,6	–	–
Maa-ainesten ottoalue	4,709	4	–	–	–	3	–	–	–
Turvemaa, ei ojia tai kulku ojien suuntaisesti, T2 tai 02, tiheys alle 4000 kpl/ha, lehti puussa	5,393	–	–	–	–	6	5,5	5,5	–
Sähkölinja	5,632	–	–	–	–	–	–	–	–
Rautatien ylitys	5,85	5	–	–	–	–	–	–	–
Turvemaa, kulku poikkisarkaan, 03 tai 04	9,252	–	–	–	–	–	–	–	–
Turvemaa, kulku poikkisarkaan, A0, T1 tai S0	9,286	–	–	–	–	–	–	–	–
Turvemaa, kulku poikkisarkaan, T2 tai 02, tiheys alle 4000 kpl/ha, lehti puussa	10,383	–	–	–	–	–	–	10,5	–
Kivennäismaa, T2 tai 02, tiheys yli 4000 kpl/ha, lehti puussa	12,015	–	–	–	13,015	–	15	–	–
Turvemaa, ei ojia tai kulku ojien suuntaisesti, T2 tai 02, tiheys yli 4000 kpl/ha, lehti puussa	14,121	–	–	–	–	–	16	14,5	–
Turvemaa, kulku poikkisarkaan, T2 tai 02, tiheys yli 4000 kpl/ha, lehti puussa	19,111	–	–	–	–	–	20	19,5	–
Kivikko	26,328	24	–	–	–	–	–	–	–

Esteet: vesialue, virtavesi / leveys yli 2 m, vaikeakulkuinen suo, pelto / viljelykaudella, moottoritie, varastoalue, lentokenttäalue, louhos, kaatopaikka, urheilu- ja virkistysalue, aita, puutarha, pihapiiri, jyrkäne

vittiin metsävarakuvioaineisto ja Maanmittauslaitoksen maastotietokannan tiedot. Kustannuspinnat tehtiin jokaiselle alueelle erikseen. Testauksessa käytettiin vain kesän kustannuspintaa, eli varttuneissa taimikoissa (T2) ja nuorissa kasvatusmetsissä (02) puissa olevat lehdet nostivat näiden metsikkökuvioiden kustannusarvoa. Pellot katsottiin esteiksi, eli ainoastaan niiden reunoilla liikkuminen oli sallittua. Kustannuspinta muodostettiin valitsemalla lähtöaineistoista tarvittavat paikkatietoaineistot, luokittelemalla ne eri kulkukelpoisuusluokkiin ja tallentamalla luokalle sen kustannusarvo (taulukko 2). Valmis kustannuspinta oli rasteri, jonka resoluutio oli kahdeksan metriä. Valittu resoluutio oli kompro-

missi kustannuspinnan tarkkuuden ja siitä aiheutuvan laskennan aikavaativuuden välillä. Toista vaihetta varten muodostetut kustannuspinnat tallennettiin niin, että niiden arvojen muuttaminen oli nopeaa vaiheeseen kolme siirryttäessä. Kustannuspintojen muodostamisessa käytettiin ArcGIS-ohjelmistoa ja sen vakiotyökalujen avulla tätä tarkoitusta varten laadittuja omia työkaluja.

Reitinlaskentaa varten tarvittiin myös maanpinnan korkeusmalli. Käytetyt korkeusmallit oli tuotettu Metsäkeskuksen hankkiman laserkeilausaineiston avulla. Metsäkeskuksen aineistoja käytettiin, koska ne olivat saatavilla ilman erillistä aineistohankintaa ja ne vastasivat tarkkuudeltaan Maanmittauslaitok-



Kuva 2. Reitinlaskennan vaiheet.

sen laserkeilausaineiston avulla tuottamia korkeusmalleja (Korkeusmalli 2 m 2014). Korkeusmallien resoluutio muutettiin kustannuspintoja vastaavaksi kahdeksaan metriin.

Kustannuspinnan ja korkeusmallin lisäksi reitinlaskennan lähtöaineistona oli testaajan ilmoittama yhteen reittiin kuuluva inventoitavien kuvioiden joukko sekä tieto siitä, mihin testaaja aikoi pysäköidä autonsa. Kuviot ja auton paikka ilmoitettiin tallentamalla ne Metsäkeskuksen metsävaratietojärjestelmään, josta ne poimittiin reitinlaskentaa varten.

2.3 Reitinlaskenta

Reitit laskettiin Esri Inc:n ArcGIS-ohjelmistolla. Reitinoptimoinnin työkalut tehtiin tätä tarkoitusta varten ArcGIS:n ja sen laajennosten vakiotyökaluja yhdistelemällä (ArcGIS Help 10.1. 2014). Toiminto, jolla laskettiin reitti kuvioiden sisälle, hankittiin Esri Finlandilta (Etula ja Antikainen 2014). Se liitettiin osaksi muuta, Metsäkeskuksessa toteutettua reitinoptimointiohjelmistoa. Reitinlaskenta jakautui neljään osaan: kuvioiden asettaminen inventointijärjestykseen, reittien laskeminen kuvioiden välille, reittien laskeminen kuvioiden sisälle sekä eri vaiheissa laskettujen viivojen yhdistäminen yhdeksi reittiviivaksi (kuva 2).

Kuviot asetettiin inventointijärjestykseen tuottamalla ensin vaihtoehtoisia reittejä kuviolta toiselle. Laskennan aikavaativuuden pienentämiseksi vaihtoehtoisia reittejä ei laskettu kaikilta kuviolta kaikille kuviolle. Reitit laskettiin kaikilta kuviolta viidelle lähimmälle kuviolle. Laskennassa käytettiin ArcGIS-ohjelmiston Spatial Analyst -laajennoksen Cost Distance- ja Cost Path -työkaluja. Kuviot asetettiin järjestykseen ratkaisemalla pienimmän kokonaiskustannuksen tuottava reitti Network Analyst -laajennoksen Route-toiminnon avulla. Tässä vaiheessa kuviot mallinnettiin pistemäisinä kohteina koska tämän työkalun syöteenä voi olla vain pistemäisiä kohteita.

Kun kuvioiden järjestys oli selvillä, laskettiin lopulliset reitit kuvioiden välille käyttäen lähtöaineistona kuvioita aluemaisina kohteina. Reittien päätepisteet tuottivat samalla seuraavassa vaiheessa tarvittavat kuvion sisääntulo- ja ulosmenopisteet.

Reitinlaskenta kuvioiden sisälle perustui kuviolle sijoitettuun tasaiseen ehdokaspisteverkostoon ja näiden pisteiden välillä liikkumiseen niitä yhdistäviä viivoja pitkin eli niin sanottuun kuljetusverkkoon. Ratkaisussa haettiin heuristisesti lyhyin mahdollinen reitti, joka kulki n havaintopisteen kautta. Havaintopisteiden määrä n riippui kuvion piirin ja pinta-alan suhteesta ja riippuvuussuhde oli määritetty metsäinventointityöhön liittyvän empiirisen aineiston

perusteella. Havaintopisteet saattoivat olla mitkä tahansa n kappaletta ehdokaspisteiden joukosta. Jos kuvio oli niin pieni, ettei sille mahtunut riittävää määrää havaintopisteitä, reitti tuotettiin kuvion sisääntulopisteestä kuvion keskipisteen kautta ulosmenopisteeseen. Toimintoon liittyi kolme parametria. Ne olivat reitiltä saavutettu näkymä (metreinä), kuinka suuri osuus kuviosta on nähtävä, että se olisi riittävän tarkkaan inventoitu (prosentteina) sekä laskennassa käytettävien iteraatiokierrosten lukumäärä (laskenta-ajan rajoittamiseksi). Näkymä ja riittävä peittävyys oli kaikilla testaajilla sama, koska parhaista mahdollisista arvoista ei ollut riittävää ennakkotietoa. Näkymänä käytettiin 30 metriä. Tämä oli todennäköisesti hyvä arvo kuvioilla, joilla puusto oli silmän alapuolella. Pidemmässä taimikoissa näkymä on pienempi, mutta puskurin leveyden pienentäminen johtaa siihen, että laskenta pysähtyy iteraatiokierrosten maksimin täytyessä. Näin ollen yksi arvo todettiin riittävän hyväksi. Riittävänä peittävyytenä käytettiin 60 prosenttia. Tämäkin arvo vaihtelee kuvion ominaisuuksista riippuen. Jos kuvion puusto on tasaista, se voidaan havaita ilmakuvasta ja liikkumisen tarve vähenee. Epätasaisissa puustoissa kuvio tulee kiertää läpi tarkemmin. Koska kuvion tietojen perusteella ei voitu ennakkoon päätellä, mikä arvo olisi sopiva, käytettiin yhtä arvoa. Iteraatiokierrosten yläraja oli kymmenen kierrosta. Empiirisen aineiston perusteella havaittiin, että kierrosten lukumäärän kasvattaminen ei juuri paranna reittien laatua, mutta pidentää laskenta-aikaa selkeästi.

Reitinlaskennan viimeisessä vaiheessa yhdistettiin kuvioiden välille ja sisälle tuotetut reitit yhdeksi yhtenäiseksi viivaksi. Valmis reitti tallennettiin Metsäkeskuksen metsävaratietojärjestelmään, mistä testaajat saattoivat siirtää sen maastotallentimelleen. Koska kuvioiden järjestysnumeroita ei voinut siirtää maastotallentimelle, testaajalle lähetettiin sähköpostilla pdf-muotoinen kartta, joka sisälsi kuvioiden järjestysnumerot sekä valmiin reitin.

2.4 Maastotestauksen aikana kerätty aineisto

Maastotestauksen perusteella haluttiin verrata toisiinsa inventoinnin tuottavuutta kolmen testivaiheen aikana. Tuottavuuslukujen laskemiseksi tarvittiin tiedot maastossa kuljetusta matkasta, maastossa käytetystä ajasta sekä päivän aikana inventoidusta hehtaareista. Testaajat merkitsivät lomakkeelle tiedot todellisesta työajasta, eli lähtöajan autolta, saapumisajan autolle ja ajan, jolloin työ oli mahdollisesti keskeytynyt esimerkiksi puhelun tai ruokatauon vuoksi. Testaajien ilmoittamat ajat tarkistettiin GPS-laitteella tallennetusta aineistosta, mikäli tiedot saatiin talteen niin, että laitteen aikaleimat olivat käytössä. Kuljettu matka laskettiin tallennetusta GPS-jäljestä. Inventoitu pinta-ala laskettiin keräämällä metsävaratietojärjestelmästä kuvat testajittain ja inventointipäivämäärittäin.

Testaajat saattoivat määritellä kolmannen vaiheen kustannusarvot joko sähköpostitse palautettavalla lomakkeella tai puhelinkeskusteluna. He saattoivat ilmoittaa haluamansa kustannusarvot numeerisesti tai sanallisesti (esimerkiksi: ”reitit kiertävät liian usein tien kautta ja ovat liian pitkiä”, tällöin teiden kustannusta nostettiin suhteessa muihin maastoluokkiin).

Maastotestauksen päätyttyä testaajille toimitettiin palautelomake, jolla he saattoivat arvioida reitinoptimointimenetelmän eri osa-alueita sekä siitä saamaansa hyötyä. Lisäksi he saattoivat kertoa näkemyksensä reitinoptimointityökalun jatkokehitystarpeista sekä antaa vapaata palautetta. Myös maastotestauksen aikana annettu palaute kirjattiin muistiin.

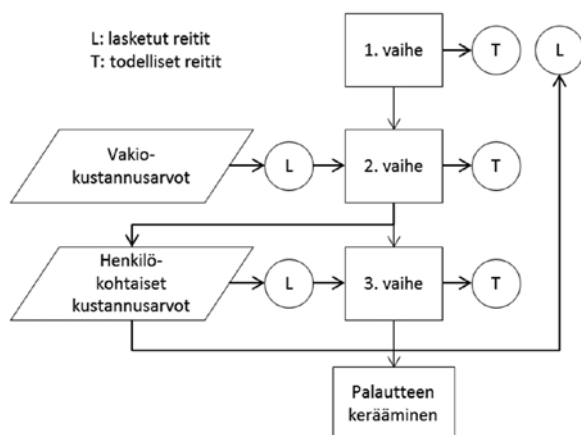
GPS-laitteella tallennettujen aineistojen käsittelyn yhteydessä määritettiin myös, mitkä viivat kuuluvat kuhunkin ensimmäisen vaiheen reittiin ja mihin auto oli tällöin pysäköity. Ensimmäisen vaiheen inventointireiteille tuotettiin jälkikäteen laskennalliset reitit, jotka laskettiin vastaavasti kuin muutkin reitit kunkin testaajan henkilökohtaista kustannuspintaa käyttäen.

2.5 Yhteenveto tulosten määrittämisessä käytetystä aineistosta

Testauksen aikana kerättiin siis seuraavat aineistot:

- 1) testaajien omat reitit ensimmäisessä vaiheessa,
- 2) jälkikäteen laskennallisesti tuotetut reitit ensimmäisessä vaiheessa inventoiduille kuvioille,
- 3) laskennalliset reitit toisessa ja kolmannessa vaiheessa,
- 4) toteutuneet reitit toisessa ja kolmannessa vaiheessa,
- 5) maastotyöhön käytetty aika reittikohtaisesti,
- 6) maastossa kuljettu matka reittikohtaisesti,
- 7) testaajien antama sanallinen palaute.

Yhteenveto maastotestauksen vaiheista ja sen yhteydessä kerätyistä aineistoista on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Maastotestauksen vaiheet ja testauksessa kerätty aineisto.

Maastotestauksen aikana inventoitiin yhteensä 4155 metsikkökuvioita, joiden yhteispinta-ala oli 6761,2 hehtaaria. Kuvioiden keskikoko vaihteli voimakkaasti. Pienin kuvioiden keskikoko oli Pohjanmaalla (1,16 ha) ja suurin Pohjois-Pohjanmaalla (2,54 ha). Maastossa inventoitavien kuvioiden osuus yksityismetsien metsätalousmaan pinta-alaan verrattuna vaihteli eri testaajien työalueilla 12 prosentista 23 prosenttiin.

Tässä tutkimuksessa yksi reitti sisälsi auton paikasta, siirtymisen autolta ensimmäiselle kuvioille, reitin inventoitavien kuvioiden välillä ja sisällä sekä paluun autolle. Testaajan työtavasta riippuen reittejä kertyi päivässä 1–12 kappaletta riippuen siitä, kuinka usein autoa oli tarpeen siirtää päivän mittaan. Lopullinen aineiston koko oli 376 maastoreittiä, jotka oli kerätty yhteensä 192 maastopäivänä. Taulukkoon 3 on koottu tiedot maastotestauksen yhteydessä kerätyistä reiteistä testialueittain.

GPS-tallennuksen katkosten vuoksi osa reiteistä täytyi hylätä. Mikäli reitistä puuttui vain pieni osa, kuljettu reitti pääteltiin ja reittiviivaa täydennettiin. Mikäli todellisen reitin päättely ei ollut mahdollista, koko reitti hylättiin. Kahdelta testaajalta jäi puuttumaan kokonainen testauksen vaihe. Taulukko 3 ei sisällä reittejä, jotka täytyi hylätä.

Aineiston perusteella pyrittiin tutkimaan kulkeamisen miellyttävyyttä ja reitinoptimoinnista saatua hyötyä. Koska nämä eivät ole yksinkertaisesti mitattavissa olevia suureita, testaajien antaman palautteen merkitys oli kaikkein suurin. Vaikka tuottavuutta pyrittiin arvioimaan myös numeerisesti, oli tutkimus pikemminkin laadullinen kuin määrällinen.

Taulukko 3. Yhteenveto maastotestauksen aikana kerätyistä reiteistä testialueittain.

Sijaintikunta	Testausaika	Testauksen aikana inventoituja kuvioita, kpl	Testauksen aikana inventoitujen kuvioiden pinta-ala, ha	Testauksen aikana inventoitujen kuvioiden keskikoko, ha	Testauksen aikana kuljettu matka, km	Reittien lukumäärä
Pudasjärvi	21.5.–16.8.	530	762,6	1,44	199,1	57
Kuusamo	30.5.–30.7.	443	1707,9	3,86	181,7	34
Jämijärvi	20.5.–4.9.	389	413,1	1,06	123,8	82
Karvia	20.5.–6.8.	618	723,0	1,17	179,0	33
Pieksämäki	21.5.–7.8.	512	821,1	1,60	138,2	32
Hämeenlinna	25.6.–28.8.	385	850,1	2,21	171,4	59
Korsnäs	28.5.–27.8.	812	1005,7	1,24	264,3	62
Närpiö	26.6.–5.9.	466	477,7	1,03	109,7	17

3 Tulokset

3.1 Reitinoptimointityökalun toiminta

3.1.1 Testaajien palaute kustannuspinnasta

Testaajien palautteen perusteella kustannuspinta todettiin varsin realistiseksi. Eräs testaajista kirjoitti: ”Pääosin reititys toimii asiallisesti. Se ottaa huomioon maaston, puuston ja tiet, mikä helpottaa työtä.” Sama johtopäätös voitiin tehdä siirryttäessä toisesta vaiheesta kolmanteen vaiheeseen, sillä kaksi kahdeksasta testaajasta ei halunnut lainkaan muuttaa kustannusarvoja (taulukko 2). Muut testaajat tekivät pääasiassa pieniä muutoksia, joilla yleensä säädeltiin teiden ja metsämaan miellyttävyyssjärjestystä tai vaikutettiin turvemaiden ja kivennäismaiden miellyttävyyden eroihin. Henkilökohtaisten kustannusarvojen käytölle oli kuitenkin tarvetta, sillä testaajien kustannuspintaan tekemät muutokset saattoivat olla keskenään päinvastaisia. Esimerkiksi osa testaajista halusi pienentää teiden kustannusta, jotta reitti hyödyntäisi teitä enemmän. Osa taas koki, että reitti kiersi tietä pitkin liian usein, kun he olisivat halunneet liikkua suoraviivaisemmin kohteelta toiselle.

Kustannuspintaan kohdistuva kritiikki liittyi pääasiassa seikkoihin, jotka vaikuttavat selvästi kulkeamisen miellyttävyyteen, mutta joita on mahdotonta mallintaa aineiston puuttumisen vuoksi. Tällaisia ovat esimerkiksi pohjakaasvillisuus, jotkin kulkemista helpottavat reitit (ajourat, pengertiet ja avoimet tilanrajat), tuulenkaadot, hakkuutähteet sekä tieto siitä, onko oja todellisuudessa ylitettävissä vai ei. Toisaalta osa palautteesta voidaan huomioida kustannuspinnan muodostamisessa. Esimerkiksi pihapiirien ympärille toivottiin laajempaa puskuria.

3.1.2 Testaajien palaute ennakkoon lasketuista inventointireiteistä

Kuvioiden järjestys koettiin pääasiassa hyödylliseksi. Esimerkiksi erään testaajan sanoin: ”Turha vaeltelu vähenee.” Kuvioiden järjestys oli yleensä looginen, kuten esimerkiksi kuvan 4 inventointireitin kuvioilla 1–10 ja 18–28. Toisaalta kuvioiden järjestys havaittiin reitinoptimointityökalun suurimmaksi

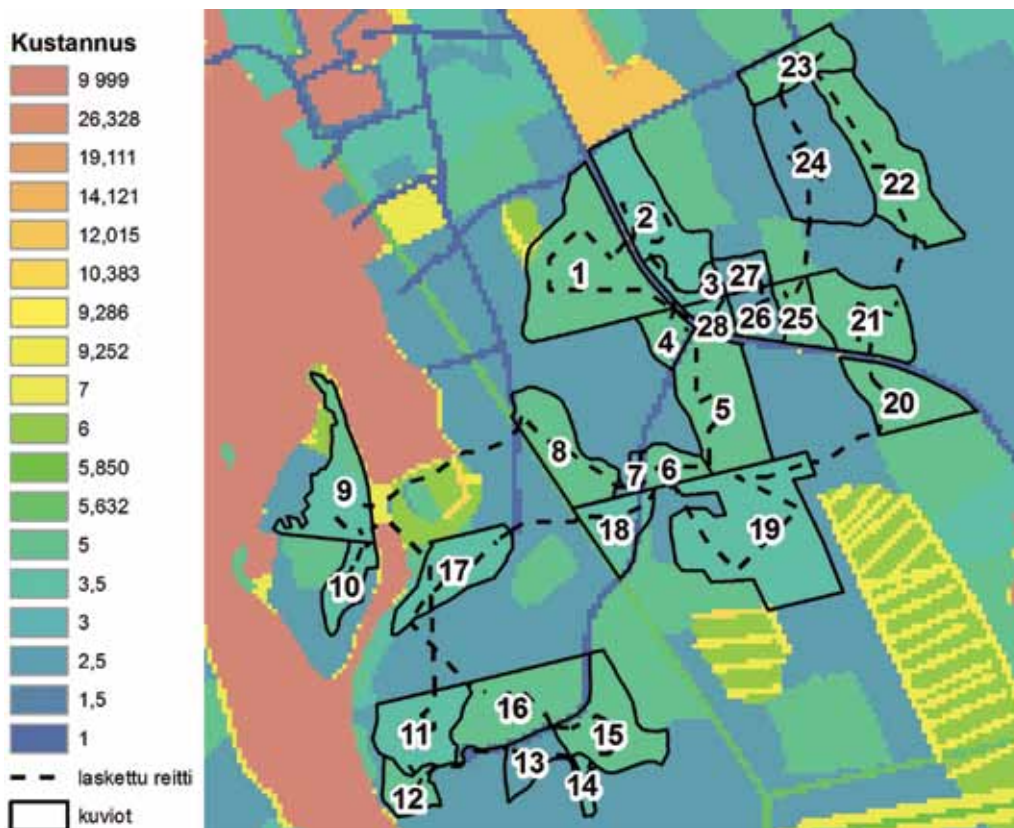
ongelmaksi. Kuvioiden inventointijärjestyksen määrittäminen niiden keskipisteiden perusteella aiheutti reitteihin epäloogisuutta, sillä keskipistettä käyttämällä oli mahdotonta huomioida kuvion koko tai muoto. Kun lähimpien kuvioiden lukumäärä oli samalla rajattu, lähelle ulottuva suuri kuvio saattoi olla mahdoton saavuttaa, koska sille ei ollut kulkuyhteyttä reittiverkostossa. Reitti saattoi myös kulkea järjestysnumeroltaan myöhemmän kuvion läpi matkalla aikaisemmalta kuviolta toiselle. Tosiasiallisesti matkan varrella oleva kuvio olisi voitu inventoida samalla kerralla, mutta reitinoptimointityökalu ei osannut huomioida tätä, vaan toi reitin takaisin kuviolle kun se oli järjestysnumeron perusteella vuorossa. Kuvioiden epälooginen järjestys tulee selvästi esille kuvan 4 kuvioilla 11–17. Kuviolta 10 siirrytään kuviolle 11 kuvion 17 kautta. Tällöin ei kuitenkaan kerätä inventointitietoa, vaan kuviolle palataan reitin myöhemmässä vaiheessa. Kuvion 17 järjestysnumero on seurausta kuvioiden 11–16 rypästä. Kuvio 18 ei ole millekään rypään kuviolle viiden lähimmän joukossa, joten työkalu ei tuota reittiä kuviolta 15 tai 16 kuviolle 18 vaikka reitti olisi hyvin edullinen (tietä pitkin).

Kuvioiden välille lasketut reitit olivat pääosin toimivia. Negatiivinen palaute oli pääasiassa seurausta kustannuspinnan puutteista tai kuvioiden järjestämiseen liittyvästä ongelmasta. Testaajan sanoin: ”Reitit menivät turhan usein ristiin tai tekivät pistoja, turhinta maastotyössä on kävellä samasta kohtaan uudelleen tai pahimmillaan omia jälkiä uudestaan.”

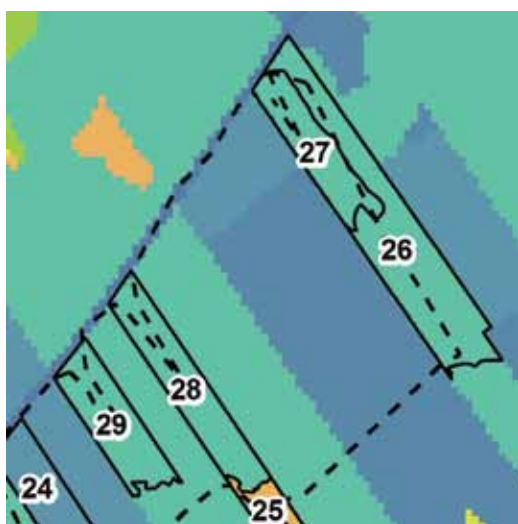
Vierekkäin sijaitsevien kuvioiden välillä siirtymä toimi teknisesti oikein, mutta se ei ollut aina looginen. Reitti siirtyi kuviolta toiselle kustannukseltaan edullisimmasta pisteestä. Mikäli kuviot sijaitsivat tien varrella, reitti siirtyi kuviolta toiselle aina tien varressa ja aiheutti turhaa edestakaisin kulkemista (kuva 5). Vastaava ilmiö toistui myös kauempana teistä vähemmän häiritsevällä tavalla.

Työkalu ei osaa ottaa huomioon kuvioiden sijaintia toisiinsa nähden. Kuviot inventoidaan lisäksi aina peräkkäin, eikä useamman kuvion inventointia rinnakkain oteta huomioon. Etenkin pitkillä ja kapeilla kuvioilla jälkimmäinen työskentelytapa on tehokas (kuva 6).

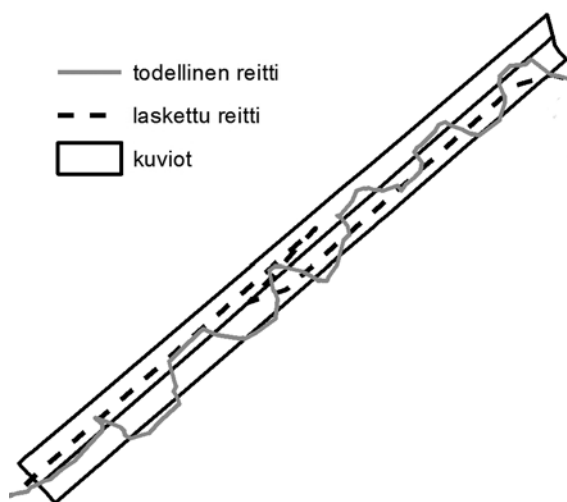
Kuvioiden sisälle lasketut reitit saivat kaksijakoista palautetta. Toisaalta ne koettiin riittävän hyviksi ja osa raportoiduista puutteista olisi mahdollista kor-



Kuva 4. Laskettu inventointireitti.



Kuva 5. Reitti tien varressa sijaitsevilla kuvioilla.



Kuva 6. Kahden vierekkäisen kapean kuvion inventointi.

jata parametreja (reitien puskurin leveys, nähdyn tulevan alueen osuus, iteraatiokertojen lukumäärä) muuttamalla. Toisaalta havaittiin, että kuvion sisälle laskettava reitti ei riipu kuvion koosta ja muodosta vaan puuston homogeenisuudesta. Puustoltaan tasaisissa metsiköissä lasketut reitit saattoivat olla tarpeeseen nähden liian pitkiä, kun taas puustoltaan epätasaisissa metsiköissä olisi ollut tarpeen liikkua enemmänkin. Erään testaajan mukaan: ”Tämän toiminnon voisi jättää pois ja antaa täysi vastuu kulkemisesta inventoijalle.”

Reittien tuottaminen kuvioiden sisälle oli aikavaativuudeltaan reitinlaskentaketjun selkeästi raskain osa. Itse reittien tuottaminen sujui nopeasti iteraatiomaksimia säätämällä, mutta ehdokaspisteiden ja niitä yhdistävien viivojen tuottaminen vei tehokkaallakin tietokoneella useita tunteja. Laskenta-aikoja ei kuitenkaan mitattu systemaattisesti, sillä laskentaa tehtiin usealla laskentateholtaan erilaisella tietokoneella.

3.1.3 Todellisten inventointireittien ja jälkikäteen laskettujen reittien vertailu

Testaajien todellisten reittien ja jälkikäteen laskettujen reittien vertailua varten selvitettiin päivämäärän ja GPS-jäljen perusteella, mitä kuvioita testaajat olivat inventoineet vaiheessa 1. Osa reiteistä hylättiin katkenneen GPS-tallennuksen vuoksi. Reittejä laskettiin yhteensä 146 kappaletta. Todellisten ja jälkikäteen laskettujen reittien vertailussa selvitettiin, pystyykö reitinoptimointityökalu jäljittelemään ihmisen suunnittelemaa reittejä vai onko siinä ongelmia, jotka eivät sovi yhteen todellisuuden kanssa. Toisaalta arvioitiin maastotestaajien reitinvalintaa, eli valitsivatko he kustannuspinnan perustella helpokulkuisia reittejä.

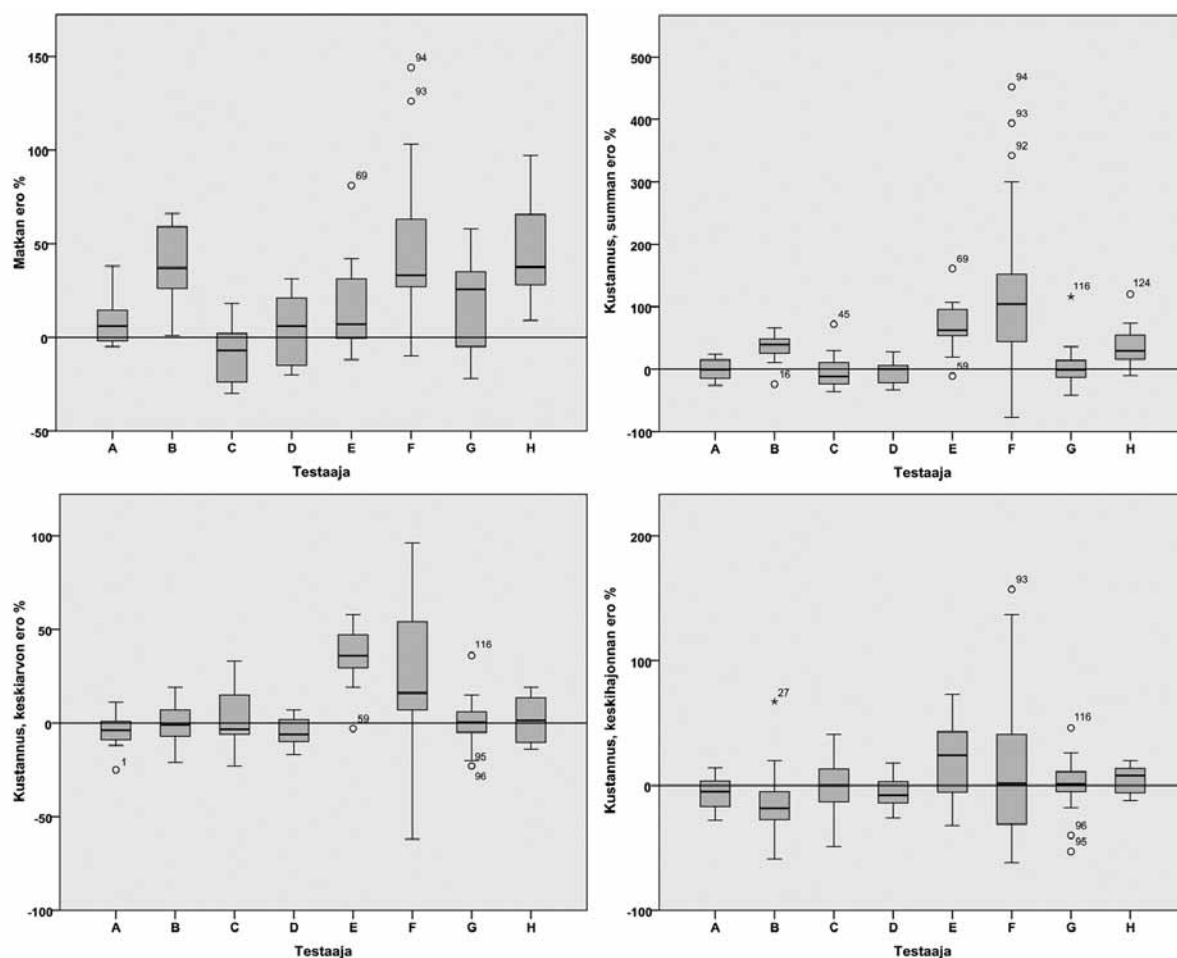
Ensimmäisenä havaittiin, että kuvion inventoimiselle asetettu 60 prosentin peittävyysraja oli yleensä liian korkea. Kun laskettiin niiden kuvioiden osuus, jossa peittävyysraja ei täytynyt, se vaihteli testaajittain 18 prosentin ja 85 prosentin välillä (taulukko 4). Vaikuttaa siltä, että peittävyysraja olisi voinut olla matalampi testauksen myöhemmissä vaiheissa, mikä olisi yksinkertaistanut toisen ja kolmannen vaiheen reittejä.

Taulukko 4. Toteutuneen peittävyyden jakauma maastotestauksen ensimmäisessä vaiheessa inventoiduilla kuvioilla.

Sijaintikunta	Peittävyys, %				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
Pudasjärvi	4	10	17	30	38
Kuusamo	36	18	30	9	6
Jämijärvi	0	6	12	17	65
Karvia	2	11	28	19	40
Pieksämäki	11	48	23	11	7
Hämeenlinna	36	18	30	9	6
Korsnäs	0	8	19	35	39
Närpiö	11	24	21	20	24

Todellisia ja laskettuja inventointireittejä verrattiin toisiinsa laskemalla niiden pituus, kulkukustannus, kustannuksen keskiarvo ja -keskihajonta. Tämän jälkeen verrattiin lasketun reitin arvoja vastaavan todellisen reitin arvoihin. Vertailusta jätettiin pois reitit, joissa oli korkeintaan kolme metsikkökuvioita, sillä oletus oli, että lyhyiden reittien numeerisessa vertailussa pienetkin GPS-jäljen virheet saattavat vääristää tuloksia. Vertailuun jäi 129 reittiä. Vertailun tulos on esitetty kuvassa 7 testaajittain. Lasketut reitit olivat tyypillisesti todellisia reittejä pidempiä. Tähän vaikutti reitinlaskentatyökalun epälooginen toiminta, mikä aiheutti reitteihin ylimääräisiä silmuja. Toinen selittävä tekijä on inventoinnin toteutunut peittävyys: mikäli peittävyys on pieni, todellisen reitin pituus on lasketun reitin pituuteen verrattuna pienempi. Inventoijien omat reitit vaikuttivat pääosin tehokkailta, joskin joissakin tapauksissa laskettu reitti olisi lyhentänyt kuljettua matkaa kymmeniä prosentteja. Reittien kulkukustannus noudatteli niiden pituutta, eli todellinen reitti oli usein laskettua edullisempi, sillä reitin pituus kasvattaa sen kulkukustannusta. Pienen inventointipeittävyyden vaikutus tuloksiin oli huomattavissa etenkin testaajalla F, sillä inventoitavat kuviot olivat useimmiten taimikkoja, joiden kulkukustannus olisi ollut suuri. Kun tarkasteltiin reittien kulkukustannuksen keskiarvoa ja -hajontaa, havaittiin, että laskettujen reittien arvot olivat usein todellisten reittien alapuolella. Reitinlaskentatyökalu pystyi siis ohjaamaan reittiä matalan kustannuksen alueille usein ihmistä tehokkaammin.

Reittejä tarkasteltiin myös silmävaraisesti. Lyhyissä, muutaman kuvion (1–5 kpl) inventointireiteissä ei juuri ollut eroja todellisten ja jälkikäteen

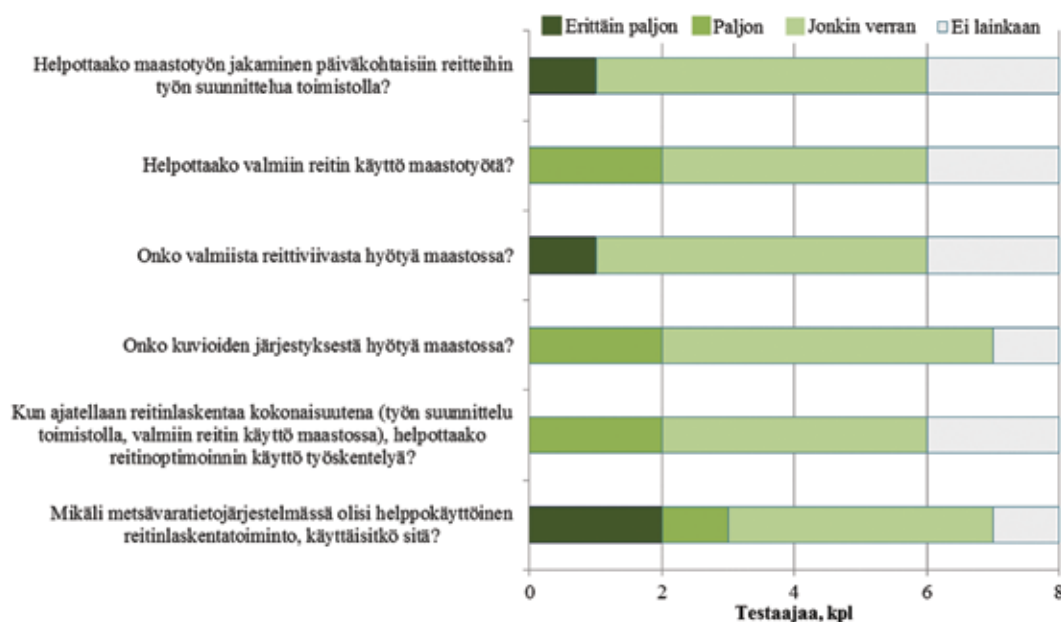


Kuva 7. Ensimmäisen vaiheen todellisten ja laskettujen reittien vertailu. Vertailun tulokset on esitetty laskettujen ja todellisten reittien arvojen erona prosentteina. Testaajiin viitataan testialueen tunnuksilla (A Pudasjärvi, B Kuusamo, C Jämijärvi, D Karvia, E Pieksämäki, F Hämeenlinna, G Korsnäs ja H Närpiö).

laskettujen reittien välillä. Tämä on ymmärrettävää, sillä päivän inventointityön pilkkoutuminen useisiin lyhyisiin reitteihin tarkoittaa reitinoptimointiongelman pelkistymistä kuvioiden osajoukoiksi, joiden järjestäminen on ihmiselle helppoa, ja joiden inventoimiseen ei yleensä ole kovin monta erilaista järkevää reittiä. Pidempiin reitteihin liittyvät epäloogisuudet olivat yhteydessä lähinnä kuvioiden järjestämisen ongelmaan. Kuvioiden järjestäminen toimi erityisen huonosti pitkillä ja kapeilla rinnakkain sijaitsevilla kuvioilla ja laajoissa vierekkäisten kuvioiden kuvioryhmissä. Tällöin lasketut reitit olivat tyypillisesti todellisia pidempiä. Toisaalta monet

reiteistä olivat lähes samanlaisia inventoijan reittien kanssa.

Lisäksi arvioitiin korkeusmallin vaikutusta laskettuihin reitteihin, sillä yksikään testaajista ei ollut antanut siitä palautetta. Tämä toteutettiin laskemalla Pohjois-Pohjanmaan alueen testaajien aineistoista vaihtoehtoiset reitit korkeusmallin kanssa tai ilman sitä, sillä korkeusvaihtelut olivat näillä kahdella testialueella suurinta. Rinnakkaisia reittejä laskettiin yhteensä 27. Korkeusmallin kanssa ja ilman korkeusmallia lasketut reitit olivat varsin samanlaisia. Vain kolme reittiä 27:stä (11 %) poikkesi toisistaan selvästi. Tällöin korkeusmallin kanssa lasketut reitit



Kuva 8. Testaajien mielipiteitä reitinoptimoinnin hyödyllisyydestä.

olivat enemmän samankaltaisia todellisen inventointireitin kanssa kuin ilman korkeusmallia lasketut. Saattaa olla, että korkeusvaihtelu otetaan huomioon varsin tehokkaasti jo pelkän kustannuspinnan kautta. Korkeusvaihtelu on usein otettu huomioon ihmisen tekemissä kohteissa, esimerkiksi tielinjauksissa. Sama vaikutus saattaa tulla vähäisempänä esiin myös metsikkökuvioinnissa.

3.2 Testaajien arviot reitinoptimoinnista saadusta hyödystä

Testaajien mielipiteet jakautuivat kahtia selvitetäessä reitinoptimoinnin hyödyllisyyttä. Osa koki ajatuksen hyödyllisenä. ”Ajatus on hyvä.” ”Paljon potentiaalia.” ”Itse tulisin kyllä ottamaan ohjelman käyttöön varauksella maalaisjärjen käyttö sallittu.” Toisaalta taas ajateltiin: ”Maastotyöntekijä pystyy parhaiten arvioimaan kaikki asiaan vaikuttavat tekijät, joita on paljon. Kokeneella suunnittelijalla on tarpeeksi hyvä reitinoptimointityökalu omassa päässään.” ”Onhan tämä varsin mielenkiintoinen kekeilu, mutta en ole täysin vakuuttunut siitä, että se nopeuttaisi töitä.” Reitinoptimoinnin koettiin vaikuttavan myös työn mielekkyyteen, joko positiivisesti

(”Valmista reittiä on helppo seurata miettimättä itse omaa kulkemistaan”) tai negatiivisesti (”Maastossa kuljettavien reittien suunnittelu on työn ’hauskinta’ osaa”).

Testaajat arvioivat, että reitinoptimoinnista hyötisivät eniten aloittelevat maastotyöntekijät, esimerkiksi harjoittelijat. Lisäksi menetelmä saattaisi helpottaa liikkumista maastossa paikallistuntemuksen puuttuessa. Reitinoptimoinnista ei todettu olevan hyötyä, mikäli maastossa inventoitavien kuvioden osuus on suuri ja ne sijaitsevat rypäinä lähellä toisiaan. Vastaavasti hyöty kasvoi, mikäli kuvat sijaitsevat kaukana toisistaan. Enemmistö testaajista koki saavansa reitinoptimoinnista hyötyä jonkin verran, selvästi alle puolet paljon tai erittäin paljon (kuva 8).

Eri testaajat kokivat hyötävänsä reitinoptimoinnista eri työvaiheissa eri tavoin. Vastaukset eivät olleet systemaattisia niin, että osa testaajista ei olisi saanut menetelmästä mitään hyötyä tai toiset vastaavasti paljon. Vastaukset olivat pikemminkin ristikkäisiä, eli testaajan henkilökohtaisten mieltymysten mukaan hyötyä oli joissakin vaiheissa enemmän, toisissa vähemmän. Kaikkia vastauksia tarkasteltaessa vastauksista ei voitu erottaa, että reitinoptimointi olisi erityisesti helpottanut jotakin tiettyä työvaihetta. Ainoastaan viimeinen kysymys reitinoptimoin-

Taulukko 5. Työn tuottavuus testialueilla maastotestauksen eri vaiheissa.

Sijaintikunta/ testin vaihe	Maastopäiviä, kpl	Reittejä, kpl	Testauksen aikana inventoitujen kuvioiden pinta-ala, ha	Maastotyöhön käytetty aika, h	Työn tuottavuus ha/h
Pudasjärvi/1	10	34	328,8	41,17	8,0
Kuusamo/1	9	14	626,8	23,33	26,9
Jämijärvi/1	9	65	249,4	38,42	6,5
Karvia/1	9	15	337,8	36,92	9,1
Pieksämäki/1	9	11	268,2	40,05	6,7
Hämeenlinna/1	8	41	219,6	20	11,0
Korsnäs/1	11	26	408,3	54,98	7,4
Närpiö/1	8	8	202,2	30,18	6,7
Pudasjärvi/2	6	9	166,1	22,17	7,5
Kuusamo/2	10	10	617,2	23,83	25,9
Jämijärvi/2	0	0	0	0	0
Karvia/2	9	15	315,8	39,58	8,0
Pieksämäki/2	10	11	269,4	46,92	5,7
Hämeenlinna/2	8	8	310,8	41,23	7,5
Korsnäs/2	9	17	329,3	48,17	6,8
Närpiö/2	9	9	275,5	41,27	6,7
Pudasjärvi/3	10	14	267,7	43,58	6,1
Kuusamo/3	10	10	463,9	21,25	21,8
Jämijärvi/3	5	17	163,7	19,25	8,5
Karvia/3	3	3	69,4	7,42	9,4
Pieksämäki/3	10	10	283,5	37,42	7,6
Hämeenlinna/3	10	10	319,7	42,65	7,5
Korsnäs/3	10	19	268,1	36,12	7,4
Närpiö/3	0	0	0	0	0

titoiminnon hyödyntämisestä poikkeaa vastausten jakaumasta jonkin verran, sillä testaajista valtaosa olisi kuitenkin halukas hyödyntämään reitinoptimointia omassa työssään, jos tarvittava työkalu olisi käytössä.

3.3 Reitinoptimoinnin vaikutukset työn tuottavuuteen

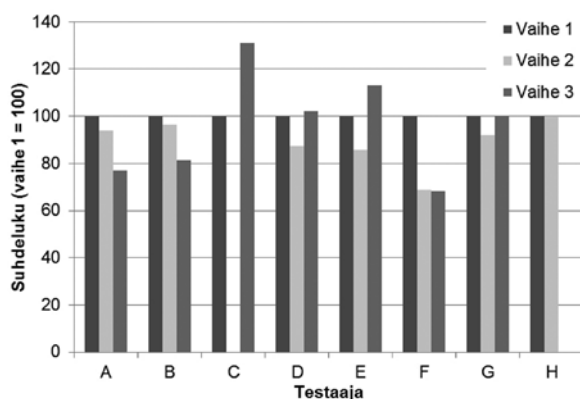
Aineiston perusteella laskettiin tunnuslukuja työn tuottavuudelle (taulukko 5). Testaajien työn tuottavuutta verrattiin vain heidän omaan työhönsä eri testauksen vaiheissa, sillä alueelliset ja henkilökohtaiset erot olivat liian suuria testaajien väliseen vertailuun.

Työn tuottavuus vaihteli testaajittain suuresti. Työn tuottavuuden tunnus ”hehtaaria tunnissa” oli laskettu todellisesta maastotyöhön käytetystä ajasta. Aikaan eivät sisältyneet automatkat tai työn keskeytyminen esimerkiksi ruokatauon tai puhelun

vuoksi. Tuottavuus vaihteli välillä 6,8–25,4 hehtaaria tunnissa. Kuvassa 9 on esitetty testaajien työn tuottavuus maastotestauksen eri vaiheissa. Tulokset on suhteutettu niin, että ensimmäisen vaiheen tuottavuus on saanut suhdeluvun 100 ja muiden vaiheiden tuottavuutta on verrattu tähän vaiheeseen.

Tyypillistä oli, että työn tuottavuus laski toisessa vaiheessa. Kolmannessa vaiheessa tuottavuus kehittyi kaksijakoisesti: toisaalta se saattoi lähteä nousemaan, toisaalta se saattoi jäädä selvästi ensimmäistä vaihetta matalammalle tasolle. Erilaista kehitystä selittää todennäköisesti testaajan oman työtavan ja reitinoptimointimenetelmän soveltuminen toisiinsa. Esimerkiksi, mikäli testaaja oli tottunut kulkemaan lyhyitä reittejä ja siirtämään autoaan usein, valmiin reitin käyttö saattoi vain hankaloittaa työtä. Reitinoptimointi tuki todennäköisesti paremmin työtapaa, jossa yhden päivän inventoitavat kuvat kuuluivat yhteen tai kahteen reittiin.

Aineistossa havaittiin myös reitinvalintaan liittymättömiä, työn tuottavuuteen vaikuttavia riippu-



Kuva 9. Työn tuottavuus maastotestauksen eri vaiheissa. Testaajiin viitataan testialueen tunnuksilla (A Pudasjärvi, B Kuusamo, C Jämsjärvi, D Karvia, E Pieksämäki, F Hämeenlinna, G Korsnäs ja H Närpiö).

vuussuhteita. Havaittiin, että maastotyön tuottavuus laskee, mikäli inventoitavia kuvioita on vähän ja ne ovat kaukana toisistaan. Tällöin yhtä inventoitua hehtaaria kohden kuljettu matka kasvaa voimakkaasti, eli merkittävä osa työpäivästä käytetään kuviolta toiselle siirtymiseen ja pienempi osa varsinaiseen inventointityöhön. Inventoitavien kuvioiden suuren keskkoon havaittiin vaikuttavan työn tuottavuuteen positiivisesti. Testaajien henkilökohtaisten ominaisuuksien ja testauksen eri vaiheiden maastotyöalueiden eroja ei voitu arvioida luotettavasti, ja osa tuloksissa esiintyvistä vaihtelusta johtunee näiden tekijöiden vaihtelusta.

3.4 Jatkokehitystarpeita

Testaajilta kysyttiin, kuinka he haluaisivat, että reitinoptimointia kehitettäisiin tulevaisuudessa. Testaajista neljä (puolet) oli sitä mieltä, ettei reitinoptimointia tarvita, vaan työ sujuu entisellä tavalla. Yksi testaaja kannatti tässä testauksessa käytettyä mallia, eli että reitti lasketaan valittujen kuvioiden ja auton paikan perusteella. Kolme testaajaa kannatti mallia, jossa inventoija määrittelee mahdollisia auton paikkoja ja antaa ajan, joka on käytettävissä yhteen inventointireittiin. Tämän jälkeen optimointityökalu hakee reittiin parhaiten sopivat kuviot ja laskee myös, milloin autoa kannattaa siirtää ja milloin kävellä kuviolta toiselle.

Testauksen aikana havaitut ongelmat ovat selkeitä kehittämiskohteita. Kustannuspinnan muodostamista pitäisi tarkentaa. Kuvioiden järjestys pitäisi saada loogisemmaksi. Kuvioiden sijainti toisiinsa nähden pitäisi ottaa huomioon siirtymisessä kuviolta toiselle ja kuvioiden inventointi rinnakkain pitäisi olla mahdollista. Kuvio olisi katsottava inventoiduksi, jos reitti kulkee sen läpi. Vastaavat havainnot tehtiin ensimmäisen vaiheen todellisten ja laskettujen reittien vertailussa.

Menetelmän kehittäminen todennäköisesti monimutkaistaa joitakin vaiheita. Samalla laskenta-aikaa pitäisi saada leikattua murto-osaan testausvaiheessa tarvitusta tuntien laskenta-ajasta. Osa laskenta-ajasta voidaan korjata käyttämällä tehokasta laskentapalvelinta, mutta ongelmat eivät ratkea ainoastaan laskentakapasiteettia kasvattamalla. Tässä testauksessa inventoitavat kuviot piti ilmoittaa viimeistään maastotyötä edeltävänä päivänä. Todellisessa tuotantotyössä reittiviivan pitäisi muodostua samalla, kun aineistoa siirretään maastotallentimelle.

4 Tulosten tarkastelu

Tuloksia tarkasteltaessa täytyy kiinnittää huomiota tutkimusasetelman ja aineistojen aiheuttamiin rajoitteisiin. Testaus suunniteltiin mahdollisimman huolellisesti perustuen tietämykseen ja hypoteeseihin, jotka olivat kertyneet ennen testauksen aloittamista. Kyseessä oli kuitenkin ensimmäinen kerta kun reitinoptimointimenetelmää testattiin maastossa, joten kaikkeen ei pystytty varautumaan etukäteen. Esimerkiksi reitinoptimointityökaluun liittyvät puutteet tulivat esiin heti testauksen toisen vaiheen alussa, ja testaajilta vaadittiin pitkämielisyyttä, jotta testaus sujui suunnitellusti loppuun saakka. Testaus päätettiin viedä kuitenkin läpi alkuperäisen suunnitelman mukaan. Testausasetelman joustamattomuus vaikutti todennäköisesti testaajien antamaan palautteeseen, sillä heitä pyydettiin seuraamaan laskettuja reittejä, vaikka oli jo havaittu, että ne saattoivat olla tietyissä tilanteissa epäloogisia. Epäloogiset reitit pidensivät laskettuja reittejä todellisiin verrattuna, mikä vaikutti todennäköisesti jonkin verran myös tuottavuuslukuun. Toista ja kolmatta vaihetta varten laskettujen reittien tarkkaa seuraamista ei edellytetty. Testaa-

jat suorittivat esimerkiksi kuvioiden inventoimista rinnakkain kapeilla kuvioilla. Koska maastotestaus tapahtui todellisen tuotantotyön ohessa, testaajilla täytyi olla mahdollisuus inventoida vaikea kuvio tarkemmin metsävaratiedon laadun takaamiseksi tai suorittaa inventointi selkeällä kuviolla mahdollisimman nopeasti työn tuottavuuden varmistamiseksi. Testitulosten ei katsottu vääristyvän tästä liikaa, sillä kaikille inventoijille oli annettu samat toimintaohjeet, ja jokaisen testaajan työtä verrattiin hänen omaan työhönsä.

Tuloksia voidaan tarkastella kolmesta näkökulmasta. Tulokset liittyvät reitinoptimoinnin tutkimuksen, aiheeseen liittyvien paikkatietomenetelmien ja Suomen metsäkeskuksen maastoinventointityön kehittämiseen.

Maastossa tapahtuvasta reitinoptimoinnista saatiin ensimmäistä kertaa tutkittua tietoa, sillä aiemmat tutkimukset ovat perustuneet kulkukelpoisuusarvioihin, jotka ovat perustuneet haastatteluihin tai tutkijan omiin arvioihin. Vahvistettiin kustannuspinnan kuvaavan maastoa realistisesti ottaen huomioon käytössä olevien aineistojen rajoitteet. Korkeusvaihtelun vaikutuksesta reitinvalintaan ei voitu tehdä luotettavia johtopäätöksiä aineiston pienen koon vuoksi, sillä suurin osa testaajista liikkui alueilla, joilla korkeusvaihtelua ei juuri ollut. Tulosten perusteella on oletettavaa, että jo kustannuspinta ohjaa reittejä korkeusvaihtelun kannalta edullisille alueille, sillä korkeusmallin käyttö paransi reittejä ainoastaan 11 prosentissa testatuista reiteistä. Korkeusvaihtelun merkitystä tulisi vielä tutkia laajemmalla aineistolla alueilla, joilla korkeusvaihtelua olisi enemmän kuin tässä tutkimuksessa. Aluemaisen kohteen inventoinnin perusteet vaikuttivat toimivilta, mutta havaittiin, että kuvion koko ja muoto eivät suoraan selitä tarvittavaa inventoinnin peittävyyttä, vaan se riippuu eniten puuston ominaisuuksista. Riittävän peittävyuden pitäisi olla puuston homogeenisuudesta riippuva muuttuja. Mikäli puuston homogeenisuutta kuvaavaa tietoa ei ole käytettävissä, on harkittava, kannattaako reittien laskeminen kuvioiden sisälle jättää reitinoptimointityökalusta kokonaan pois. Tämä pienentäisi laskentaan käytettyä aikaa.

Reitinoptimointimenetelmä todettiin kokonaisuudessaan melko toimivaksi, vaikkakin siinä tarkoitusta varten luotua työkalua pitää edelleen parantaa. Osa testaajien esittämästä kritiikistä johtui seikoista,

jotka oli vakioitu testausta varten. Reitinlaskentaan liittyvien parametrien tarkoituksenmukainen käyttö olisi todennäköisesti korjannut osan negatiivisesta palautteesta.

Paikkatietomenetelmien kehittämisen näkökulmasta oli arvokasta havaita, että maastotyön apuvälineeksi soveltuvia inventointireittejä oli mahdollista tuottaa laskennallisesti. Todellisiin inventointireitteihin verrattuna lasketut reitit jäljittelivät niitä useimmissa tapauksissa varsin hyvin. Toisaalta moniin reitteihin sisältyi hyvin epäloogisia reitinvalintoja ja turhia silmukoita. Joissakin tapauksissa laskettu reitti vaikutti todellista reittiä tehokkaammalta. Jatkokehitystarpeissa nousi esiin muun muassa tarve ottaa huomioon inventoitavien kuvioiden sijainti toisiinsa nähden, mikä vaatisi paikkatiedon käsittelyä tästä tutkimuksesta poikkeavalla tavalla. Laskenta-ajan pienentämiseksi NP-täydellisiä ongelmia on käsiteltävä yhä tehokkaammin heurististen menetelmien avulla.

Metsäkeskuksen näkökulmasta tarkasteltuna oli todettava, ettei reitinoptimointityökalu ollut tällaisenaan valmis tuotantokäyttöön. Menetelmä vaikuttaa kuitenkin lupaavalta käytännön työn näkökulmasta. Testaajista vähemmistö arvioi, että reitinoptimoinnista olisi heille paljon hyötyä. Toisaalta, suurimmalle osalle menetelmästä oli hyötyä vähintään jonkin verran. Mikäli työkalun puutteet korjattaisiin ja siihen integroitaisiin siirtymät autolla, voidaan olettaa, että arvioitu hyödyllisyys kasvaisi.

Työn tuottavuustulosten perusteella ei voi tehdä johtopäätöksiä siitä, kuinka paljon reitinoptimoinnin käyttöönotto vaikuttaisi työn tuottavuuteen. Tuottavuuslukuihin liittyvää tulosta voidaan tulkita niin, että työskentelytavan muutos toisessa vaiheessa hidasti kaikkien testaajien työtä. Kolmannessa vaiheessa henkilökohtaisten kustannusarvojen käyttöönotto ja uuteen työtapaan tottuminen saattoi saada tuottavuuden nousuun. Toisaalta tuottavuus saattoi jäädä edelleen ensimmäistä vaihetta alemmalle tasolle. Tästä voitaneen päätellä, että osa testaajista osasi suunnitella tehokkaita reittejä itse niin, että laskettujen reittien seuraaminen vain hankaloitti työtä. Tuloksia arvioitaessa on huomioitava, että kahdeksan testaajan joukko oli hyvin pieni. Myöskään henkilökohtaisten ominaisuuksien ja maastotyöalueiden erojen vaikutusta ei pystytty selvittämään. Tarkempien tuottavuusarvioiden tuot-

tamiseksi testaaajia pitäisi olla selvästi enemmän.

Tässä tutkimuksessa pyrittiin vaikuttamaan vain inventointireittiin ja oletettiin, että muut tuottavuuteen liittyvät tekijät eivät muutu. Tämä oletus ei pitänyt täysin paikkaansa. Tulosten perusteella havaittiin, että työn tuottavuus ei riipu pelkästään reitinvalinnasta, vaan erityisesti maastotyöalueen ominaisuuksista. Metsäkeskuksen maastotyön tehostamisessa pitäisi kiinnittää huomiota myös näihin tuottavuustekijöihin, esimerkiksi kuvioinnin laatuun. Vaikka maastossa inventoitavan pinta-alan pienentäminen laskee maastotyön tuottavuutta, on se paras keino koko inventointiprosessin tehokkuuden kasvattamiseen. Mikäli tässä onnistutaan menetelmäkehityksen myötä, reitinoptimoinnin merkitys kasvaa, sillä se soveltuu parhaiten tilanteeseen, jossa inventoitavia kuvioita on vähän ja ne ovat hajallaan. Maastossa inventoitavien kuvioiden valintaan voitaisiin soveltaa Storen ja Antikaisen (2010) tutkimaa menetelmää, jossa kuvion maastotarkastustarvetta arvioitaisiin tärkeyskartan avulla. Siinä maastotarkastustarpeeseen vaikuttaisivat kuvion tietojen arvioitu luotettavuus, kuvion koko ja sen sijainti. Tällöin tiedoiltaan epäluotettavat kuviot tulisivat valituksi inventointireittiin, mutta mikäli tiedot olisivat välttävät, pieniä kaukana sijaitsevia kuvioita ei inventoitaisi maastossa. Toisaalta, tiedoiltaan välttävät kuviot tulevat mukaan reittiin, jos ne sijaitsevat sopivasti matkan varrella. Tällainen tärkeyskartta voitaisiin sisällyttää reitinoptimointityökaluun.

Tässä tutkimuksessa valmiiksi laskettuja reittejä käytettiin maastotyön ohjeellisina reitteinä. Käytännön soveltamisessa reittejä tulisi käyttää pikemminkin inhimillisen harkinnan apuvälineenä. Tällöin inventoija voisi valita reitistä käyttöön parhaat osat, mutta tehdä itsenäisiä päätöksiä silloin, kun laskettu reitti ei sovellu todelliseen tilanteeseen. Tutkimuksen tuloksista on selvästi pääteltävissä reitinoptimointimenetelmän ongelmakohdat, joiden korjaaminen parantaisi menetelmän käytettävyyttä. Kehitystyön yhteydessä tulisi arvioida, millainen menetelmä olisi mahdollista kehittää nykytekniikalla. Tulevaisuuden tavoitteena tulisi olla erään testaajan esittämä visio autonavigaattorin maastoversiosta. Reitinoptimointityökalu pitäisi pystyä siirtämään maastolaitteelle niin, että reitti voitaisiin laskea työpäivän aikana uudelleen koska tahansa, esimerkiksi kun reitiltä on poikettava jonkin esteen

vuoksi tai arvioitu käytettävissä oleva aika muuttuu. Mikäli laskennan aikavaativuutta saataisiin pienennettyä selvästi, ja työkalun toiminta suunniteltaisiin huolellisesti, saattaisi tämä olla mahdollista jo nykyisillä ohjelmilla ja maastolaitteilla. Tällöin aineiston esikäsittely tehtäisiin mahdollisimman suurelta osin tehokkaalla palvelimella ja lopullinen reitin ratkaisu maastolaitteella. Aineistojen siirrosta tulisi huolehtia niin, että työkalua voitaisiin käyttää myös ilman verkkoyhteyttä, sillä se ei ole maasto-oloissa aina käytettävissä.

Vastaava toimintamalli olisi sovellettavissa myös metsävaratiedon keruun ulkopuolelle. Reitinlaskennassa käytettävä kustannuspinta pitää muodostaa käytettävissä olevien aineistojen ja käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi metsän virkistyskäyttäjän arviot kulkemisen miellyttävyydestä poikkeavat todennäköisesti huomattavasti metsäinventoijan näkemyksestä. Mikäli olisi tarpeen liikkua aluemaisilla kohteilla, niiden sisälle tuotettavien reittien muodostamissäännöt pitäisi määritellä tilanteen mukaan. Kuitenkin jo pelkän kustannuspinnan avulla voitaisiin tuottaa optimaalisia reittejä pistemäisten kohteiden välille, soveltuen moniin eri tarkoituksiin.

Kiitokset

Kiitokset Suomen metsäkeskukselle reitinoptimointimenetelmän kehittämisen ja maastotestauksen mahdollistamisesta. Erityisesti haluan kiittää maastotestaukseen osallistuneita henkilöitä hyvästä yhteistyöstä ja arvokkaasta palautteesta.

Kirjallisuus

- Antikainen, H. 2009. Terrain path optimization using the connectivity graph approach applied to GIS data structures. Väitöskirja. Maantieteen laitos, Oulun yliopisto. Nordia Geographical Publications 38(3). 98 s.
- ArcGIS Help 10.1. 2014. [Verkkodokumentti]. Esri Inc. Saatavissa: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Welcome_to_the_ArcGIS_Help_Library/00qn0000001p000000/. [Viitattu 7.6.2014].
- Balstrøm, T. 2002. On identifying the most time-saving

- walking route in a trackless mountainous terrain. *Geografisk Tidsskrift* 102(1): 51–58.
- Etula, H. & Antikainen, H. 2012. Maaston kulkukelpoisuuden mallintaminen metsäsuunnittelijan näkökulmasta reitinoptimointia varten. *Terra* 124(1): 29–43.
- & Antikainen, H. 2014. Determining an optimum inventory route for an areal object: the case of forest inventory in Finland. *Fennia* 192(1): 23–35.
- & Store, R. 2011. Metsävaratiedon ajantasaistaminen tapahtuma- ja toimenpidetietojen avulla yksityismetsissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2011: 207–220.
- Garey, M.R. & Johnson, D.S. 1979. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. W.H. Freeman, New York. 338 s.
- Korhonen L., Pippuri I., Packalén P., Heikkinen V., Maltamo M. & Heikkilä J. 2013. Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. *Silva Fennica* 47(2): id 952. 20 s.
- Korkeusmalli 2 m. [Verkkojulkaisu]. Maanmittauslaitos. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet>. [Viitattu 7.6.2014].
- Maltamo, M., Packalén, P., Kallio, E., Kangas, J., Uutera, J. & Heikkilä, J. 2011. Airborne laser scanning based stand level management inventory in Finland. *Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*, University of Tasmania, Australia, 16–20 October 2011. 9 s.
- Miller, H. & Shaw, S.-L. 2001. Geographic information systems for transportation. Oxford University Press, New York. 458 s.
- Rees, W. 2004. Least-cost paths in mountainous terrain. *Computers & Geosciences* 30(3): 203–209.
- Store, R. & Antikainen, H. 2010. Using GIS-based multicriteria evaluation and path optimization for effective forest field inventory. *Computers, Environment and Urban Systems* 34(2): 153–161.
- Suvinen, A., Tokola, T. & Saarilahti, M. 2009. Terrain trafficability prediction with GIS analysis. *Forest Science* 55(5): 433–422.
- Tapanainen, T. 2010. Luonnossaliikkujan kulkukelpoisuusanalyysin parantaminen tarkoilla maastotiedoilla. Julkaisematon pro gradu -tutkielma. Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto. 68 s.
- Tuominen S., Pitkänen J., Balazs A., Korhonen K.T., Hyvönen P. & Muinonen E. 2014. NFI plots as complementary reference data in forest inventory based on airborne laser scanning and aerial photography in Finland. *Silva Fennica* 48(2): article id 983. 20 s.
- Won-Ik, P., Do-Jong, K. & Ho-Joo, L. 2013. Terrain trafficability analysis for autonomous navigation: A GIS based approach. *International Journal of Control, Automation, and Systems* 11(2): 354–361.
- Xiang, W.-N. 1996. A GIS based method for trail alignment planning. *Landscape and Urban Planning* 35(1): 11–23.

18 viitettä